

**Dispositif et procédé de détection et de mesure non  
invasives des propriétés d'un milieu**

La présente invention est relative aux dispositifs  
5 et procédés de détection et de mesure non invasives des propriétés optiques et de champs électriques d'un milieu.

Plus particulièrement, l'invention concerne un dispositif de détection non invasive des propriétés d'un milieu par interférométrie, ce dispositif comprenant :

10 - une source optique pour éclairer au moins une zone à sonder du milieu avec un faisceau lumineux dont le parcours définit un axe optique,

- des moyens de mesure des variations de la phase du faisceau lumineux au cours de son passage dans la zone à  
15 sonder, ces moyens de mesure

. comprenant un interféromètre pour diviser le faisceau lumineux en un faisceau de référence et un faisceau sonde, dans cet interféromètre, l'asservissement des longueurs respectives du faisceau de référence et du  
20 faisceau sonde étant actif jusqu'à une fréquence de coupure  $f_c$ , et

. ayant une fréquence d'échantillonnage de signal  $f_a$ .

Le document US-A-5 394 098 décrit un exemple d'un  
25 tel dispositif utilisé pour tester des composants opto-électroniques, en utilisant une source optique constituée d'un laser. Plus précisément, des champs électriques sont mesurés dans les composants opto-électroniques par l'intermédiaire d'une couche de matériau constituant un  
30 milieu optiquement actif recouvrant au moins la partie du composant que l'on veut tester.

Dans le présent document, on désigne par "milieu optiquement actif", un milieu présentant des propriétés

électro-optiques et plus particulièrement un milieu présentant un effet électro-optique linéaire (dit effet Pockels), ou un effet électro-optique quadratique dont le seuil de manifestation est toutefois plus élevé que dans le cas linéaire, tout en restant compatible avec l'usage de lasers de puissance à impulsions brèves.

Ce type de dispositif présente cependant l'inconvénient de ne permettre des mesures qu'avec une fréquence d'échantillonnage de signal  $f_s$  supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$ . Ce type de dispositif ne peut pas être utilisé en particulier pour la détection de champs électriques en volume dans des milieux biologiques. Car les variations de d'indice de réfraction dues aux champs électriques dans les systèmes biologiques ont essentiellement lieu à des fréquences inférieures à 1 kHz alors que la fréquence  $f_c$  doit être de quelques kHz pour éliminer les bruits extérieurs (thermiques, mécaniques, acoustiques, etc.).

La présente invention a notamment pour but de pallier cet inconvénient.

A cet effet, on prévoit selon l'invention, un dispositif de détection non invasive des propriétés d'un milieu par interférométrie, qui, outre les caractéristiques déjà mentionnées, est caractérisé par le fait qu'il comporte des moyens de balayage adaptés pour balayer, avec le faisceau sonde, la zone à sonder et une zone de référence, avec une fréquence  $f$  d'acquisition d'images enregistrées par les moyens de mesure des variations de la phase du faisceau lumineux, supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$ .

Ainsi, on obtient une modulation de la fréquence de variation du signal correspondant au phénomène électro-optique observé, à une fréquence  $f$  plus élevée et avantageusement plus élevée que la fréquence de coupure  $f_c$

de l'asservissement (qui est passe bas) des longueurs respectives du faisceau de référence et du faisceau sonde.

Notons également que la zone de référence peut avoir une taille minimale d'un pixel.

5 Dans des modes de réalisation de l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

- les moyens de balayage balayent la zone à sonder et la zone de référence selon une première direction de  
10 l'espace, à une fréquence  $f_x$  et selon une deuxième direction de l'espace avec une fréquence  $f_y$ , pour former une image de  $n$  pixels selon la première direction et  $m$  pixels selon la deuxième direction, les fréquences  $f_x$  et  $f_y$  étant choisies telles que  $f_x = f_y/n$  et  $f_y = f_a/m$ ,  $f_x$  et  $f_y$  étant supérieures à  
15  $f_c$  ; en fait, ces première et deuxième directions de l'espace sont perpendiculaires à l'axe optique ;

- les moyens de mesure des variations de la phase du faisceau lumineux comprennent un microscope confocal, dans lequel est placée la zone à sonder de manière adaptée  
20 pour former une image d'un plan de la zone à sonder; ainsi, grâce au microscope confocal, on peut obtenir une résolution spatiale tridimensionnelle ; il est alors possible de sonder le volume du milieu ; cette disposition permet de sonder des milieux, sans préparation particulière si le milieu est doté  
25 de propriétés électro-optiques; la résolution spatiale de la mesure des champs électriques n'est limitée que par l'optique utilisée ;

- il comporte des moyens de déplacement du milieu, selon les trois dimensions de l'espace, sous le faisceau  
30 sonde;

- les moyens de balayage comprennent quatre déflecteurs acousto-optiques, deux pour défléchir le faisceau lumineux, en amont du microscope confocal, chacun

respectivement dans l'une des première et deuxième directions de l'espace et deux pour redresser le faisceau lumineux chacun respectivement dans l'une des première et deuxième directions de l'espace, en aval du microscope confocal ;

- au moins un déflecteur acousto-optique, en aval du microscope confocal, est réglé pour incliner l'ordre 0 du faisceau lumineux par rapport à l'axe optique, et conserver l'ordre 1 paraxial ; ainsi, l'ordre 0 du faisceau quitte l'axe optique et l'un des ordres 1 du faisceau, en sortie des premiers déflecteurs, a une position moyenne dans l'axe optique ; si l'intensité de l'ordre 0 du faisceau est non nulle, la partie correspondante du faisceau quitte l'axe optique et ne parvient ni sur la zone à sonder, ni sur les moyens de photo-détection du faisceau ; éventuellement une lunette de Galilée permet d'augmenter l'angle entre l'ordre 1 et l'axe optique ; et

- il comporte, en amont du microscope confocal, des moyens de contrôle de la polarisation du faisceau sonde en incidence sur la zone à sonder.

. De nombreux autres types de balayage que celui mentionné ci-dessus peuvent être envisagés. Pour n'en citer que quelques-uns :

. Balayage rectangulaire : Le balayage est effectué sur une zone d'intérêt, comprenant la zone à sonder et la zone de référence, plus petite que la surface effectivement accessible. Ce type de balayage est en particulier intéressant si la zone à sonder est réduite, on peut alors en profiter pour balayer à plus haute fréquence avec la même résolution ou augmenter la résolution en resserrant les pixels ou toute solution intermédiaire.

. Balayage de plusieurs rectangles : Le balayage est effectué sur une zone correspondant à un ensemble de

rectangles tels que ceux décrits au paragraphe précédent. La zone de référence peut être unique alors que les différentes zones à sonder correspondent à des rectangles différents. Ceci peut être utile si la zone à sonder ne peut être  
5 couverte par un seul rectangle.

. Balayage sur des surfaces de formes variées : Le balayage est effectué des surfaces circulaires, elliptiques, triangulaires, etc., ou sur une composition de ces surfaces.

. Balayage sur des surfaces complexes : Le balayage est  
10 effectué sur des surfaces aux formes complexes, telles que l'application le nécessite, par exemple pour l'étude de tout ou partie d'un composant opto-électronique ou d'un système biologique (neurone, membrane, membrane artificielle, par exemple du type couche de Langmuir-Blodgett, ...).

15 . Balayage paramétré : Le balayage est effectué selon des trajectoires avec des coordonnées  $x$  et  $y$  paramétrées comme suit :

$$x = \cos (w.n.t)$$

$$y = \cos (w.n.m.t)$$

20 où  $n$  et  $m$  sont sensiblement les nombres de pixels correspondant à une période d'acquisition respectivement selon les coordonnées  $x$  et  $y$ . Ce type de balayage permet de s'approcher au maximum des limites des modulateurs acousto-optiques. Bien entendu, on peut aussi ne conserver ce  
25 paramétrage que sur l'une des deux coordonnées.

Notons que la réalisation du système de commande de ces différents types de balayage sont connus de l'Homme du Métier.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un  
30 procédé de mise en œuvre du dispositif selon l'invention. Il s'agit, en particulier, d'un procédé de détection non invasive des propriétés d'un milieu par interférométrie, dans lequel :

- on éclaire au moins une zone à sonder du milieu avec une source optique générant un faisceau lumineux dont le parcours définit un axe optique,

- on utilise un interféromètre pour diviser le faisceau lumineux en un faisceau de référence et un faisceau sonde et mesurer le déphasage entre le faisceau de référence et le faisceau sonde après traversée de la zone à sonder,

- on asservit des longueurs respectives du faisceau de référence et du faisceau sonde à des moyens de photo-détection et

- on acquiert, avec les moyens de photo-détection, des images correspondant à la mesure du déphasage en différents points de la zone à sonder, avec une fréquence d'échantillonnage de signal  $f_s$  supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$  de l'asservissement des longueurs respectives du faisceau de référence et du faisceau sonde, caractérisé par le fait qu'on balaye avec le faisceau sonde, la zone à sonder et une zone de référence, avec une fréquence  $f$  d'acquisition d'images enregistrées par les moyens de mesure des variations de la phase du faisceau lumineux, supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$ .

Dans des modes de mise en œuvre du procédé selon l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

- on procède à un balayage de la zone à sonder et la zone de référence selon une première direction de l'espace à une fréquence  $f_x$  et selon une deuxième direction de l'espace avec une fréquence  $f_y$ , pour former une image de  $n$  pixels selon la première direction et  $m$  pixels selon la deuxième direction, les fréquences  $f_x$  et  $f_y$  étant choisies telles que  $f_x = f_y/n$  et  $f_y = f_x/m$ ,  $f_x$  et  $f_y$  étant supérieures à  $f_c$ .

- on excite le milieu à une fréquence  $f_e$  et on

mesure la variation de la phase du faisceau sonde par rapport à celle du faisceau de référence, à cette même fréquence  $f_e$  ;

- connaissant la distribution des propriétés électro-optiques du milieu, on réalise une cartographie du champ électrique dans le milieu ;

- on génère un champ électrique de configuration connue dans le milieu, de manière à révéler des propriétés électro-optiques du milieu ; et

- on dope le milieu avec des molécules, des ions, etc. ayant des propriétés électro-optiques, ou conférant au milieu des propriétés électro-optiques, afin d'exacerber les propriétés électro-optiques du milieu, si celui-ci en est déjà doté, ou pour révéler la présence de champs électriques dans un milieu qui ne possède pas intrinsèquement de telles propriétés.

La nature des milieux sondés peut, grâce à l'invention, être très diverse. Outre les composants opto-électroniques déjà cités, il peut s'agir d'une distribution locale, par exemple une interface entre deux milieux diélectriques distincts éventuellement dépourvus chacun de toute activité électro-optique intrinsèque. L'interface entre les deux milieux à caractères individuellement non électro-optiques, induit alors une brisure structurelle de centrosymétrie au voisinage de la discontinuité et la possibilité d'un effet électro-optique. Selon un autre exemple de distribution locale des propriétés électro-optiques, le milieu est amorphe. Il s'agit par exemple d'une matrice polymère contenant une solution solide de molécules électro-optiques dispersées aléatoirement et qui ont été localement orientées selon un ordre statistique non-centrosymétrique (sous l'effet d'un champ électrique induit localement par une électrode adéquate ou par des champs

optiques selon une configuration dite d'orientation tout optique qui agit localement à la focale des faisceaux orientateurs). On peut désigner de telles occurrences locales de propriétés électro-optiques sous les appellations suggestives de "surfaces électro-optiques" (cas de la distribution bidimensionnelle ou quasi-bidimensionnelle de type membrane) ou d'"îlots électro-optiques" (voxels) dans le cas d'inclusions de structures électro-optiques exogènes au milieu ambiant. Par exemple, il s'agit dans ce cas, d'inclusions de structures électro-optiques dans un film de type polymère amorphe dépourvu de propriétés électro-optiques intrinsèques (ces inclusions présentant des dimensions aux échelles nanométriques ou microniques ; ce sont par exemple des nanocristaux présentant des propriétés non linéaires quadratiques). On peut, à l'inverse, créer par désorientation axiale un défaut local d'effet électro-optique au sein d'une structure électro-optique initialement homogène (telle qu'obtenue par orientation quasi-uniforme sous champ électrique dans une configuration classique de type aiguille corona). L'invention a en particulier de l'intérêt dans deux situations symétriques. D'une part, elle permet, quand la distribution des propriétés électro-optiques est inconnue, de révéler la cartographie spatiale de cette distribution a priori inconnue par mise sous champ électrique avec un jeu d'électrodes simples permettant de maîtriser aussi bien que possible la distribution du champ au sein de l'échantillon. D'autre part, quand la distribution spatiale des propriétés électro-optiques est bien connue par d'autres moyens (par exemple dans le cas d'un procédé technologique d'élaboration contrôlée de cette distribution), l'invention permet de déterminer la cartographie du champ interne ou externe au sein de la distribution, celle-ci dépendant à la fois de cette



distribution a priori connue des propriétés électro-optiques, mais également de la géométrie des électrodes au travers desquelles est appliqué un champ électrique externe. Dans certains cas intermédiaires, la connaissance, tant de  
5 la distribution du champ électrique que des propriétés électro-optiques des structures, s'avère limitée. L'invention permet alors de réaliser avec certitude, en amont de cette double inconnue, une cartographie du déphasage optique ressenti par l'onde incidente qui vient  
10 sonder le milieu. Pour progresser dans la levée des indéterminations, l'homme de l'art émet alors des hypothèses structurelles et/ou physiques soit sur la structure du milieu électro-optique, soit sur la distribution du champ, soit sur une conjonction des deux.

15 D'autres aspects, buts et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description d'un de ses modes de réalisation.

L'invention sera également mieux comprise à l'aide des dessins, sur lesquels :

20 - la figure 1 est un schéma de principe d'un exemple de mode de réalisation d'un dispositif conforme à la présente invention ;

- la figure 2 représente schématiquement les moyens de balayage du dispositif de la figure 1 ;

25 - la figure 3 représente schématiquement le balayage réalisé avec les moyens de balayage de la figure 2 ;

- la figure 4 représente schématiquement une variante d'une partie du dispositif des figures 1 à 3 ; et

30 - les figures 5a à 5f représentent schématiquement quelques exemples d'applications du procédé selon l'invention.

Sur les différentes figures, les mêmes références

désignent des éléments identiques ou similaires.

Un exemple de mode de réalisation du dispositif selon l'invention est présenté ci-dessous en relation avec les figures 1 à 5.

5 Selon cet exemple, le dispositif selon l'invention est un dispositif de détection et cartographie quantitatives et non invasives d'un champ ou potentiel électrique ou encore de leurs dérivées spatiales et/ou temporelles dans un milieu optiquement actif, éventuellement structurellement  
10 connu.

Comme représenté sur la figure 1, ce dispositif 1 est un microscope. Il comporte une source optique 3 et un interféromètre 5 constitutif de moyens de cartographie du déphasage d'un faisceau lumineux 7. Il permet ainsi de  
15 mesurer les variations de l'indice de réfraction.

La source optique 3 est par exemple un laser. La longueur d'onde, la puissance et la nature (pulsée ou continue) de ce laser sont, bien entendu, à adapter au milieu à sonder et plus particulièrement aux espèces  
20 (molécules, ions, matériau électronique, etc.) optiquement actives révélant le champ électrique régnant dans ce milieu. Par exemple, pour une application à l'étude de composants opto-électroniques on peut être amené à utiliser un laser He-Ne émettant à 632,8 nm, avec une puissance de quelques  
25 milliwatts.

L'interféromètre 5 comporte des moyens séparateurs 9, par exemple constitués d'une lame demi-onde et d'un polariseur, des miroirs asservis 11, un porte-échantillon 13, un microscope confocal 15 et des éléments optiques 17.  
30 Selon l'exemple de mode de réalisation du microscope présenté sur la figure 1, la détection de champs électriques est effectuée en transmission. Bien entendu, il est à la portée de l'Homme du Métier de transposer cet enseignement

pour effectuer cette détection en réflexion.

L'interféromètre 5 est monté en détection homodyne. Les moyens séparateurs 9 divisent le faisceau lumineux 19 émis par la source 3 en un faisceau de référence 21 et un  
5 faisceau sonde 23. La quadrature entre le faisceau de référence 21 et le faisceau sonde 23 est asservie à  $\pi/2$  afin d'avoir accès à la variation relative de chemin optique. Un exemple d'asservissement des miroirs 11 est donné dans le mémoire de thèse doctorale de P. F. Cohadon (Laboratoire  
10 Kastler-Brossel, université Paris VI, Janvier 2000).

Le faisceau sonde 23 est focalisé, en une région d'un échantillon 25 monté dans le porte-échantillon 13, par l'intermédiaire d'une première optique 27 du microscope confocal 15. Une deuxième optique 28 du microscope confocal  
15 15 collecte le faisceau lumineux transmis par l'échantillon 25 au niveau de cette région. Notons que dans le cas d'une détection en réflexion, la réflexion peut éventuellement avoir lieu après la deuxième optique 28. Le faisceau lumineux est alors filtré par les éléments optiques 17  
20 comprenant un diaphragme qui intercepte tout signal ne passant pas par le foyer de la deuxième optique 28.

L'échantillon 25 est déplacé sous le faisceau sonde 23 grâce à une cale piézoélectrique qui déplace le porte-échantillon 13, dans les trois directions de l'espace.  
25 L'échantillon 25 est ainsi sondé en volume. Grâce à la cale piézoélectrique, il est possible d'effectuer une cartographie tridimensionnelle des champs électriques dans l'échantillon 25.

Le faisceau sonde 23 est détecté et enregistré par  
30 les moyens de cartographie du déphasage du faisceau lumineux 7. Plus précisément, ces moyens comportent des détecteurs 29 et une électronique de traitement et d'asservissement 31.

Les détecteurs 29 sont des photodiodes ultra-rapides

à haute sensibilité telles que celles décrites dans le mémoire précité de la thèse doctorale de P. F. Cohadon. Ces détecteurs 29 servent aussi bien pour l'asservissement de la longueur relative des chemins optiques du faisceau de référence 21 et du faisceau sonde 23, que pour l'enregistrement du signal transmis par l'échantillon 25.

L'électronique de traitement et d'asservissement 31 est une électronique haute fréquence connue de l'Homme du Métier.

Le dispositif 1 comporte en outre des moyens de balayage 33 du faisceau sonde 23 sur l'échantillon 25.

Ces moyens de balayage 33 sont illustrés de manière plus détaillée par la figure 2. De nombreux modes de réalisation des moyens de balayage 33 peuvent bien entendu être envisagés par l'Homme du Métier. Seul, ici, un mode de réalisation est présenté. Selon ce mode de réalisation, les moyens de balayage 33 comportent quatre déflecteurs acousto-optiques 35.

Deux de ces déflecteurs 35 sont placés en amont du microscope confocal 15 pour défléchir le faisceau sonde 23. Ces déflecteurs 35 en amont du microscope confocal sont inclinés de manière à ne conserver que l'ordre 1 du faisceau parallèle à l'axe optique. L'un de ces deux déflecteurs génère un balayage de l'échantillon 25, avec le faisceau sonde 23, selon une première direction de l'espace, à une fréquence  $f_x$ , qui est aussi la fréquence d'acquisition. L'autre de ces deux déflecteurs génère un balayage de l'échantillon 25, avec le faisceau sonde 23, selon une deuxième direction de l'espace, à une fréquence  $f_y$  (voir figure 3). On forme ainsi une image de  $n$  pixels selon la première direction et  $m$  pixels selon la deuxième direction. Si la fréquence d'échantillonnage de signal est  $f_a$ , les fréquences  $f_x$  et  $f_y$  sont choisies telles que  $f_x = f_y/n$  et

$f_y = f_a/m$  et qu'elles soient toutes deux supérieures à la fréquence de coupure  $f_c$ .

Les deux autres des quatre déflecteurs 35 sont placés en aval du microscope confocal 15 et permettent de redresser le faisceau sonde 23, chacun respectivement dans l'une des première et deuxième directions de l'espace.

Les moyens de balayage 33 permettent de moduler, à la fréquence  $f_x$  supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$ , le signal provenant des éventuels champs électriques détectés.

Comme illustré par la figure 3, on enregistre le signal transmis par l'échantillon 25 au cours du balayage selon les première et deuxième directions. Ce balayage passe par une zone à sonder 34 et une zone de référence 36. Cette zone de référence 36 peut être une zone de l'échantillon 25 lui-même dans laquelle ne varient pas les champs électriques. On soustrait alors de l'image du signal provenant des éventuels champs électriques détectés, une image de référence, c'est-à-dire une image de la phase sans potentiel ou avec un potentiel de référence ou de repos. On ramène ainsi, sur un fond noir, l'image du signal provenant des éventuelles variations détectées des champs électriques. On a donc réalisé une détection synchrone.

La démodulation du signal provenant des éventuels champs électriques détectés, est réalisée au niveau de l'électronique de traitement et d'asservissement 31, d'une manière classique.

Selon encore une variante du dispositif conforme à l'invention, représentée sur la figure 4 et qui peut être combinée avec le mode de réalisation déjà exposé, celui-ci comporte des moyens de contrôle de la polarisation 37 du faisceau sonde 23. Ces moyens de contrôle de la polarisation 37 permettent de faire varier de manière contrôlée l'état de polarisation du faisceau sonde 23 incident sur l'échantillon

25. Il s'agit par exemple de moyens de contrôle de la polarisation 37 adaptés pour obtenir une polarisation linéaire du faisceau sonde 23 dont l'angle  $\rho$  de polarisation dans le plan transverse à l'axe de propagation, est variable sur 360°. De tels moyens de contrôle de la polarisation 37 peuvent être constitués par n'importe quel dispositif connu de l'Homme du Métier, de préparation et de rotation d'un état de polarisation linéaire dans le plan transverse à l'axe optique. En particulier, ils peuvent comprendre une lame demi-onde et/ou un polariseur.

De tels moyens de contrôle de la polarisation 37 sont disposés en amont de la première optique 27. L'Homme du Métier est alors apte à mener les calculs correctifs nécessaires au passage de l'état de polarisation linéaire en amont de cette première optique 27, à l'état de polarisation elliptisé au niveau de l'échantillon 25. Un analyseur de polarisation 39 facultatif peut être placé à la sortie de la deuxième optique 28, en complément des moyens de contrôle de la polarisation 37.

Le dispositif selon l'invention peut être utilisé pour détecter des champs électriques dont les variations interviennent à une fréquence inférieure à la fréquence de coupure  $f_c$  de l'asservissement de la longueur relative du faisceau de référence 21 et du faisceau sonde 23. Ainsi, il peut être utilisé pour la détection de signaux périodiques ou non, transitoires ou non et reproductibles ou non.

Le dispositif décrit ci-dessus peut être mis en œuvre dans de nombreuses applications.

A titre d'exemple, ce dispositif peut être mis en œuvre dans un procédé, conforme à l'invention, de test de composants opto-électroniques.

Dans ce document, on désigne par composant opto-électronique, un composant électronique, microélectronique,

optronique, ou bien encore un circuit comprenant des composants d'au moins l'un de ces types. Avantageusement, ces composants opto-électroniques présentent un effet électro-optique, au moins dans une partie de la zone à  
5 étudier et/ou à cartographier.

Plus particulièrement, dans ce type de procédé, on crée un potentiel d'excitation périodique et reproductible entre deux électrodes. La zone à sonder 34 comporte au moins une partie d'un composant opto-électronique auquel on  
10 applique ce potentiel.

Ce type de procédé peut être utilisé pour l'étude de milieux segmentés (voir figure 5a). Il permet alors de caractériser et de valider des procédés de fabrication de composants opto-électroniques à des échelles microniques  
15 et/ou submicroniques. Par exemple, on peut ainsi mesurer la résolution de zones gravées optiquement actives.

Ce type de procédé peut également être mis en oeuvre pour l'étude de gradient de champs électriques, notamment par mise en oeuvre d'électrodes de forme non triviale  
20 (figure 5b). Il s'agit par exemple d'électrodes multipolaires (cf. géométrie octupolaire telle que décrite dans l'article J. Zyss, Nonlinear Optics, vol. 1, p. 3, 1991 ; voir également figure 5c), auxquelles on applique un potentiel électrique. Une structure électro-optique de  
25 symétrie multipolaire adaptée à celle des électrodes permet de révéler la dérivée du champ ; par exemple la dérivée seconde du champ au centre d'un jeu d'électrode octupolaire tel que décrit à la figure 5c, le champ et sa première dérivée s'annulant par symétrie au centre de la micro-  
30 cellule d'orientation qui y est schématisée. Il est ainsi possible, grâce au procédé selon l'invention, de réaliser, la cartographie de gradients ou de courbures de champs électriques dans des zones optiquement actives. Ces cartes

de champs peuvent être confrontées à des calculs pour les valider et affiner des modèles ou permettre au contraire de rechercher des configurations de champ dont les propriétés particulières sont difficilement accessibles par le calcul.

5 Ce type de procédé peut encore être mis en oeuvre pour l'étude de champs multipolaires (voir figure 5c). Dans ce cas, le potentiel est appliqué par l'intermédiaire d'au moins une électrode à symétrie multipolaire. Des configurations d'électrodes à symétrie multipolaire donnent  
10 accès à des structures de champs multipolaires. De telles structures de champs multipolaires permettent d'accéder, par exemple, à la compréhension de la répartition en orientation de molécules sous l'influence de ces champs multipolaires.

Selon une autre application du procédé selon  
15 l'invention, on étudie la propagation d'impulsions dans un conducteur (fil, circuit intégré, composant opto-électronique, etc.). Ce conducteur est alors placé dans un milieu optiquement actif. En soumettant le milieu à des impulsions ultra courtes, il est possible d'avoir accès, par  
20 une étude fréquentielle de la propagation de ces impulsions dans le conducteur, à des régimes transitoires ultra brefs et à des informations sur la résistance ohmiques du conducteur (voir figure 5d).

Selon encore une application du procédé selon  
25 l'invention, on étudie des phénomènes de report de champ, de recouvrement spatial, etc. Dans les composants opto-électroniques, le champ appliqué entre des électrodes n'a pas toujours une forme simple (voir figure 5e). Il peut en particulier se poser des problèmes de report de champ et de  
30 recouvrement spatial, à la fois statique ("poling" de la couche active du composant) et dynamique (champ de modulation). Grâce à la cartographie des champs électriques, obtenue avec le procédé selon l'invention, il est possible



d'optimiser la forme et la structure de ces composants, pour aboutir, par exemple, à la réduction de la tension de commande.

Selon encore une autre application du procédé selon l'invention, on étudie des agrégats fractals et en particulier la percolation dans ces agrégats. Dans la zone à sonder 34 se trouve au moins une partie d'un agrégat fractal (voir figure 5f).

On trouve également des applications particulièrement intéressantes du dispositif et du procédé selon l'invention dans le domaine de la biologie. Dans ce cas, la zone à sonder 34 comporte au moins une partie d'un milieu biologique naturel ou artificiel. En effet, par exemple, la zone à sonder 34 comporte au moins une partie d'une membrane biologique naturelle ou artificielle.

Ainsi, selon une application du procédé selon l'invention, on étudie des systèmes biomimétiques et par exemple la diffusion d'espèces moléculaires à travers des membranes artificielles. Des modifications de ces membranes dues à divers type de phénomènes (chimiques, biochimiques, électriques, rayonnement électromagnétique, etc.) peuvent être détectées grâce au dispositif selon l'invention. Ce type d'application peut s'étendre à l'étude de systèmes microfluidiques, de capsules, de vésicules, etc.

Aussi, selon une application du procédé selon l'invention, on étudie des systèmes biologiques tels que les neurones, les cellules zoologiques ou végétales, etc.

Dans le cadre de l'étude de neurones sains, la zone à sonder 34 comporte au moins une partie d'un neurone ou d'un réseau de neurones et le dispositif selon l'invention donne accès à la propagation des signaux électriques neuronaux et/ou interneuronaux, l'origine de ces signaux, etc. Le dispositif selon l'invention dans ce cas remplace

avantageusement les techniques dites de "patch-clamp" pour lesquelles, par exemple pour un champ d'observation de  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ , il aurait fallu plusieurs dizaines de milliers d'électrodes, ou plus, pour obtenir une cartographie  
5 équivalente. Grâce au dispositif selon l'invention, on s'affranchit en outre des problèmes de contact, d'encombrement stérique, etc.

Le dispositif selon l'invention, permet aussi l'étude de neurones perturbés ou pathologiques, sclérosés,  
10 dégénérés, etc.

Grâce au dispositif selon l'invention, on peut aussi observer des phénomènes électriques à petites échelles, tels que les phénomènes de surtension ou ceux se produisant dans les réactions chimiques d'oxydo-réduction, dans les  
15 réacteurs chimiques à des échelles nanométriques ou non, au niveau de micelles, de complexes argilo-humique, etc. La zone à sonder 34 constitue alors au moins une partie d'un milieu chimique.

Dans certains cas, que ce soit en électronique ou en  
20 biologie, le milieu doit être dopé avec des molécules ou des ions électro-optiques, afin d'exacerber les propriétés électro-optiques du milieu et/ou permettre d'observer des champs électriques dans des milieux dépourvus de telles propriétés.

25 A titre d'exemple de molécules électro-optiques, on cite les molécules suivantes :

- La molécule "DR1" (Dispersed Red One) est bien connue de l'Homme du Métier. Elle est plutôt utilisée pour l'étude de composants opto-électroniques et les systèmes  
30 biomimétiques.

- La molécule "Cristal Violet" est aussi bien connue de l'Homme du Métier. Elle constitue un exemple d'octupôle. Elle est sensible aux gradients successifs du

champ électrique et non au champ électrique lui-même. On n'est en effet pas limité dans la détection des champs électriques selon le procédé conforme à la présente invention, à des non-linéarités d'ordre 2, on peut utiliser  
5 des non linéarités d'ordre supérieur.

- Des molécules dérivées de la phtalocyanine par substitution périphérique avec des groupements donneurs et accepteurs d'électrons en géométrie non-centrosymétrique, sont également connues de l'Homme du Métier. Elles peuvent  
10 être utilisées pour l'étude de systèmes biologiques.

De nombreuses autres molécules peuvent être utilisées. Il peut s'agir en particulier de différentes formes des molécules indiquées ci-dessus ou dérivées de ces dernières.

REVENDICATIONS

1. Dispositif de détection non invasive des propriétés d'un milieu par interférométrie, ce dispositif  
5 comprenant :

- une source optique (3) pour éclairer au moins une zone à sonder (34) du milieu avec un faisceau lumineux (19) dont le parcours définit un axe optique,

- des moyens de mesure des variations de la phase  
10 du faisceau lumineux (7) au cours de son passage dans la zone à sonder (34), ces moyens de mesure

- . comprenant un interféromètre (5) pour diviser le faisceau lumineux (19) en un faisceau de référence (21) et un faisceau sonde (23), dans cet interféromètre (5)  
15 l'asservissement des longueurs respectives du faisceau de référence (21) et du faisceau sonde (23) étant actif jusqu'à une fréquence de coupure  $f_c$ , et

- . ayant une fréquence d'échantillonnage de signal  $f_a$ ,

20 **caractérisé par le fait qu'il** comporte des moyens de balayage (33) adaptés pour balayer, avec le faisceau sonde (23), la zone à sonder (34) et une zone de référence (36), avec une fréquence  $f$  d'acquisition d'images enregistrées par les moyens de mesure des variations de la phase du faisceau  
25 lumineux (7), supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$ .

2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel les moyens de balayage (33) balayent la zone à sonder (34) et la zone de référence (36), selon une première direction de l'espace à une fréquence  $f_x$  et selon une deuxième  
30 direction de l'espace avec une fréquence  $f_y$ , pour former une image de  $n$  pixels selon la première direction et  $m$  pixels selon la deuxième direction, les fréquences  $f_x$  et  $f_y$  étant choisies telles que  $f_x = f_y/n$  et  $f_y = f_a/m$ ,  $f_x$  et  $f_y$  étant

supérieures à  $f_c$ .

3. Dispositif selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel les moyens de mesure des variations de la phase du faisceau lumineux (7) comprennent un microscope confocal (15), dans lequel est placée la zone à sonder (34) de manière adaptée pour former une image d'un plan de la zone à sonder (34).

4. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, comportant des moyens de déplacement du milieu, selon les trois dimensions de l'espace, sous le faisceau sonde (23).

5. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, les moyens de balayage (33) comprennent quatre déflecteurs acousto-optiques (35), deux pour défléchir le faisceau lumineux, en amont du microscope confocal (15), chacun respectivement dans l'une des première et deuxième directions de l'espace et deux pour redresser le faisceau lumineux chacun respectivement dans l'une des première et deuxième directions de l'espace, en aval du microscope confocal (15).

6. Dispositif selon la revendication 5, dans lequel au moins un déflecteur acousto-optique (35), en aval du microscope confocal (15), est réglé pour incliner l'ordre 0 du faisceau lumineux par rapport à l'axe optique, et conserver l'ordre 1 paraxial.

7. Dispositif selon la revendication 6, comprenant, une lunette de Galilée pour augmenter l'angle  $\alpha$  entre l'ordre 1 et l'axe optique.

8. Dispositif selon l'une des revendications précédentes comportant en outre, en amont du microscope confocal (15), des moyens de contrôle de la polarisation (37) du faisceau sonde (23) en incidence sur la zone à sonder (34).

9. Procédé de détection non invasive des propriétés d'un milieu par interférométrie, dans lequel :

- on éclaire au moins une zone à sonder (34) du milieu avec une source optique (3) générant un faisceau lumineux (19) dont le parcours définit un axe optique,

- on utilise un interféromètre (5) pour diviser le faisceau lumineux (19) en un faisceau de référence (21) et un faisceau sonde (23) et mesurer le déphasage entre le faisceau de référence (21) et le faisceau sonde (23) après traversée de la zone à sonder (34),

- on asservit des longueurs respectives du faisceau de référence (21) et du faisceau sonde (23) à des moyens de photo-détection (29) et

- on acquiert, avec les moyens de photo-détection (29), des images correspondant à la mesure du déphasage en différents points de la zone à sonder (34), à une fréquence d'échantillonnage de signal  $f_a$  supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$  de l'asservissement des longueurs respectives du faisceau de référence (21) et du faisceau sonde (23), caractérisé par le fait qu'on balaye avec le faisceau sonde (23), la zone à sonder (34) et une zone de référence (36), avec une fréquence  $f$  d'acquisition d'images enregistrées par les moyens de mesure des variations de la phase du faisceau lumineux (7), supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$ .

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel on procède à un balayage de la zone à sonder (34) et la zone de référence (36), selon une première direction de l'espace à une fréquence  $f_x$  et selon une deuxième direction de l'espace avec une fréquence  $f_y$ , pour former une image de  $n$  pixels selon la première direction et  $m$  pixels selon la deuxième direction, les fréquences  $f_x$  et  $f_y$  étant choisies telles que  $f_x = f_y/n$  et  $f_y = f_a/m$ ,  $f_x$  et  $f_y$  étant supérieures à  $f_c$ .

11. Procédé selon l'une des revendications 9 et 10,

dans lequel on place la zone à sonder (34) dans un microscope confocal (15), de manière adaptée pour former une image d'un plan de la zone à sonder (34).

12. Procédé selon l'une des revendications 9 à 11, dans lequel on déplace le milieu, selon les trois dimensions de l'espace, sous le faisceau sonde (23).

13. Procédé l'une des revendications 9 à 12, dans lequel on excite le milieu à une fréquence  $f_e$  et on mesure la variation de la phase du faisceau sonde (23) par rapport à celle du faisceau de référence (21), à cette même fréquence  $f_e$ .

14. Procédé selon l'une des revendications 9 à 13, dans lequel on dévie, grâce à au moins un déflecteur acousto-optique (35) en aval du microscope confocal, l'ordre 0 du faisceau lumineux par rapport à l'axe optique, et conserver l'ordre 1 paraxial.

15. Procédé selon la revendication 14, dans lequel on augmente l'angle  $\alpha$  entre l'ordre 1 et l'axe optique, grâce à une lunette de Galilée.

16. Procédé selon l'une des revendications 9 à 15 dans lequel la zone à sonder (34) comporte au moins une partie d'un composant opto-électronique auquel on applique un potentiel.

17. Procédé selon la revendication 16, dans lequel on applique le potentiel par l'intermédiaire d'au moins une électrode dont la forme est adaptée pour créer un gradient de champ électrique.

18. Procédé selon l'une des revendications 16 et 17, dans lequel on applique le potentiel par l'intermédiaire d'au moins une électrode multipolaire.

19. Procédé selon l'une des revendications 16 à 18, dans lequel on place le composant opto-électronique dans un milieu optiquement actif.

20. Procédé selon l'une des revendications 16 à 19, dans lequel on étudie la propagation d'une impulsion électrique dans le composant opto-électronique.

21. Procédé selon l'une des revendications 9 à 15, dans lequel la zone à sonder (34) comporte au moins une partie d'un agrégat fractal.

22. Procédé selon l'une des revendications 9 à 15, dans lequel la zone à sonder (34) comporte au moins une partie d'un milieu biologique.

23. Procédé selon la revendication 22, dans lequel la zone à sonder (34) comporte au moins une partie d'une membrane biologique.

24. Procédé selon l'une des revendications 22 et 23, dans lequel la zone à sonder (34) comporte au moins une partie d'un neurone ou d'un réseau de neurones.

25. Procédé selon l'une des revendications 9 à 15, dans lequel la zone à sonder (34) comporte au moins une partie d'une membrane artificielle.

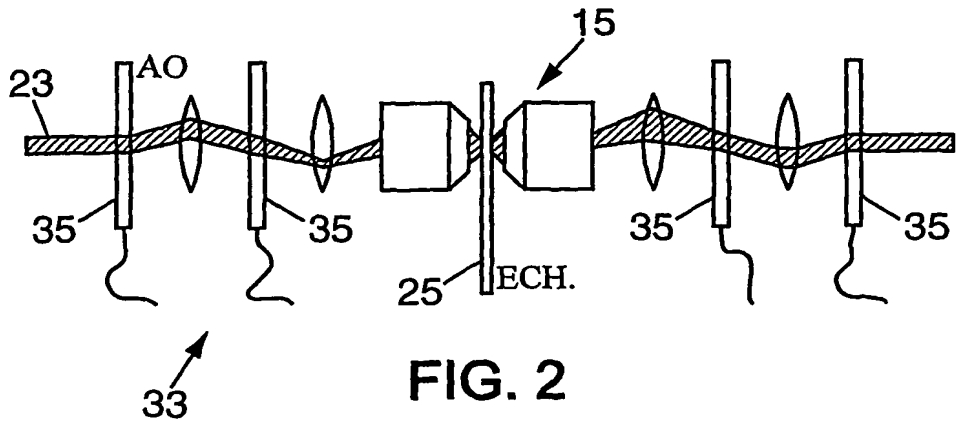
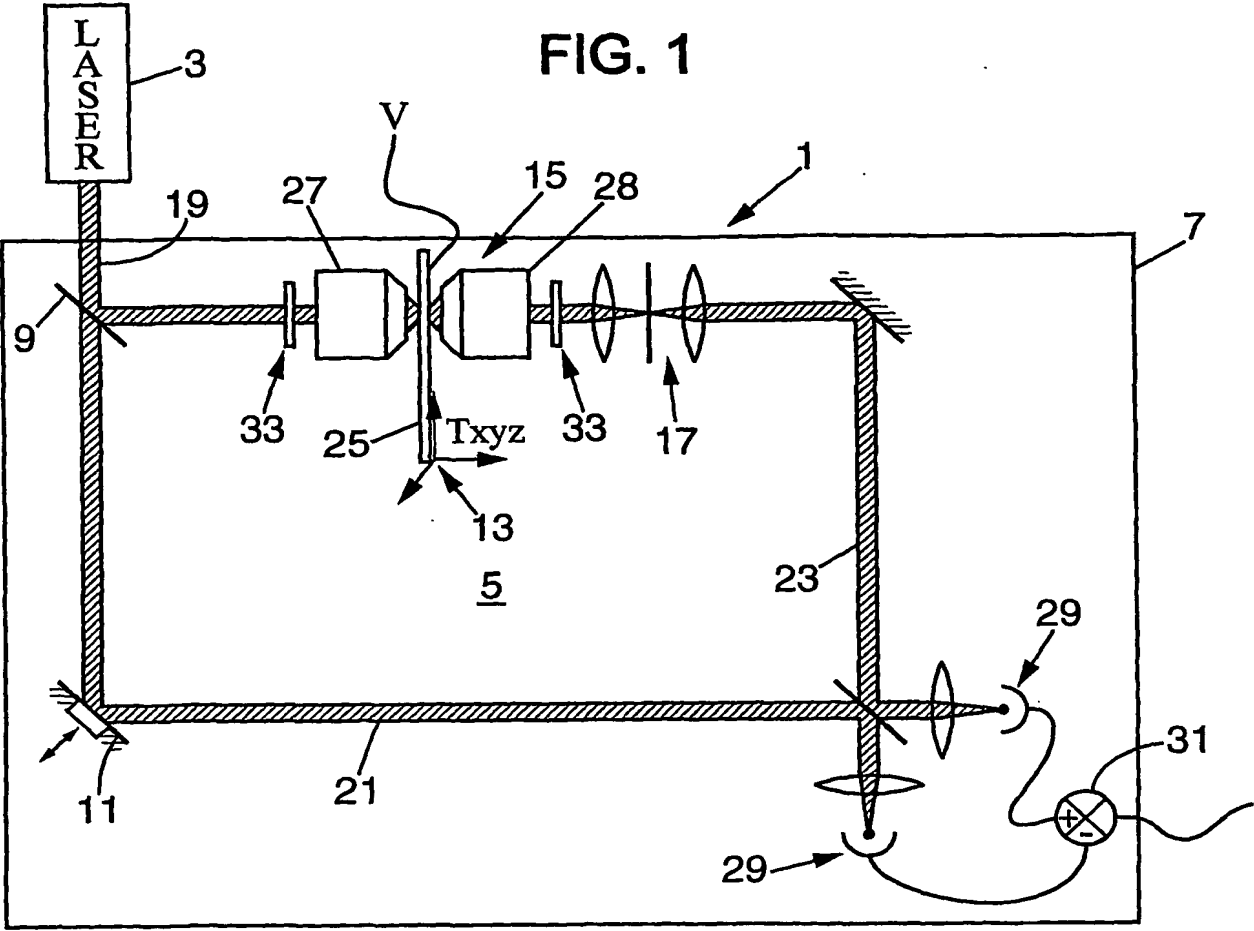
26. Procédé selon l'une des revendications 9 à 15, dans lequel la zone à sonder (34) constitue au moins une partie d'un milieu chimique.

27. Procédé selon l'une des revendications 9 à 26, dans lequel on dope le milieu avec des molécules ou des ions ayant des propriétés électro-optiques, ou conférant au milieu des propriétés électro-optiques, afin d'exacerber les propriétés électro-optiques du milieu, si celui-ci en est déjà doté, ou pour révéler la présence de champs électriques dans un milieu qui ne possède pas intrinsèquement de telles propriétés.

28. Procédé selon l'une des revendications 9 à 27, dans lequel, connaissant la distribution des propriétés électro-optiques du milieu, on réalise une cartographie du champ électrique dans le milieu.



29. Procédé selon l'une des revendications 9 à 27, dans lequel on génère un champ électrique de configuration connue dans le milieu, de manière à révéler des propriétés électro-optiques du milieu.



2/3

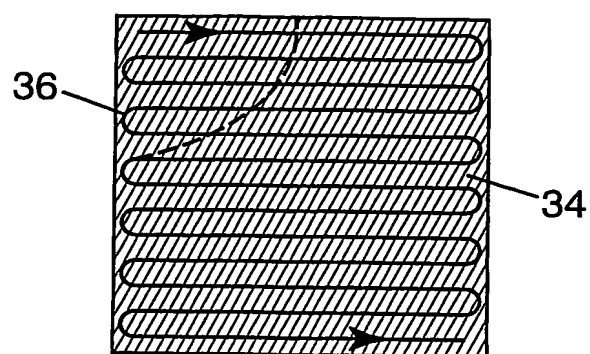


FIG. 3

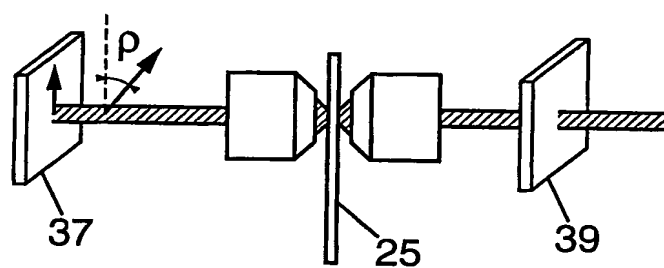


FIG. 4

10  $\mu\text{m}$  (échelle indicative)

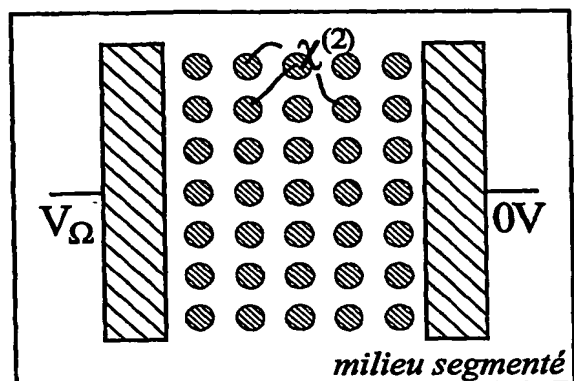


FIG. 5a

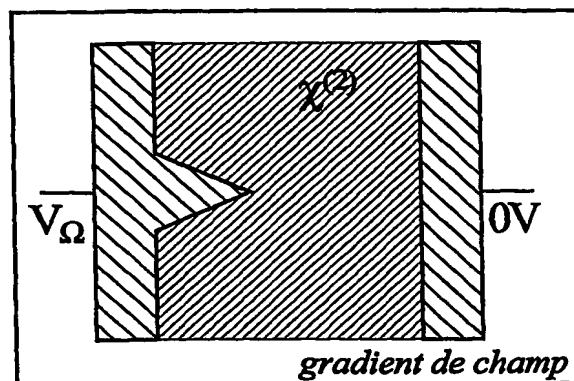


FIG. 5b

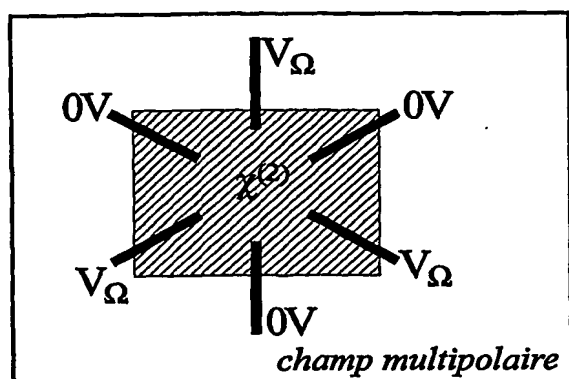


FIG. 5c

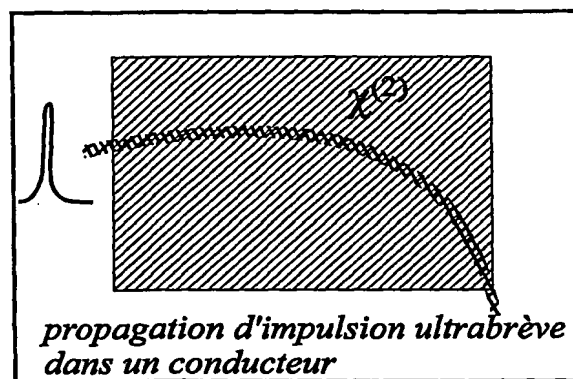


FIG. 5d

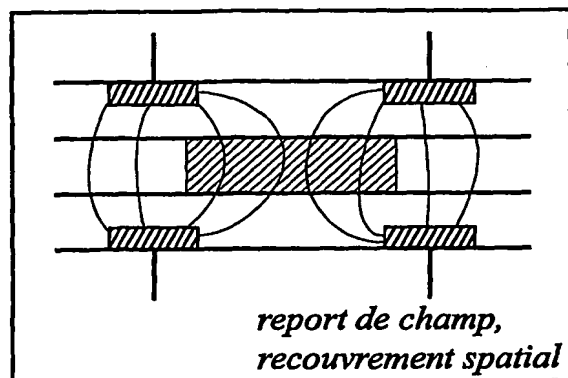


FIG. 5e

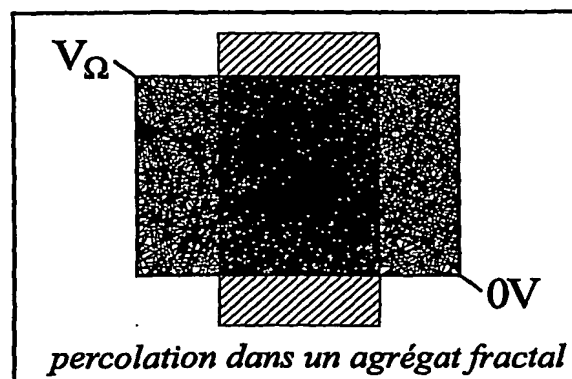


FIG. 5f